構成要素の個別性能を考慮したシステムの地震時復旧曲線

(株)篠塚研究所 正会員 〇中村孝明 静間俊郎, 東京都市大学 正会員 吉川弘道

1. はじめに

事業継続計画(Business Continuity Planning)の策定で は、事業停止となる可能性やどの程度の期間事業停止と なるのかを定量的に推計する必要である.地震時の復旧 期間の定量評価については、システム信頼性手法をベー スに建築設備の機能を対象とした研究¹⁾,生産工場の製 造機能に着目した研究²⁾,さらに道路網³⁾などがある.これ らは対象を構成要素が連なるシステムとして捉えると共に、 システム性能が復旧する過程を捉えた、いわゆる復旧曲線 の評価を主課題としている.ところが、構成要素は稼動す るか否かの2対応を前提としたものであり、固有の性能や 余力を考慮したものではない.構成要素の持つ余力は、 発災時にはシステムとしての冗長性を補完する役目を持ち、 早期復旧に貢献する.本研究は、構成要素の性能や余力 を考慮した地震時復旧曲線を評価する方法を提案すると 共に、要素の性能が復旧曲線に与える影響を示す.

2. 復旧曲線の定義

復旧曲線は当初の性能が低下あるいは停止し、その後 性能が完全に回復するまでの経時的なプロセスを描いた 曲線と定義する. 横軸は復旧に要する期間, 縦軸は当初 の性能を 1.0 とした性能回復率である. 地震被害の発生や 復旧期間の不確実性を考慮とすると, 図 1 に示すように無 数の曲線が予想でき、その平均値を復旧曲線として代表 する. また、復旧曲線は復旧期間と性能回復率の2軸に描 画されるため、軸方向の平均値を採ると 2 種の曲線⁴⁾が求 められる. 本論では、機能が限定されるシステムの復旧過 程を把握するのに優れている図中 T 曲線 $R_T(r)$ を復旧曲 線とする. 式では以下のようになる.

$$R_T(r) = \int_{0}^{\infty} G_T(t \mid r) dt \tag{1}$$

ここに, *G_r(t|r)*は性能回復率rで横に切断し,切断面を通 過する曲線群の初通過確率分布の超過確率関数である.

3. 構成要素の性能を考慮したシステム性能

n個の構成要素から成るシステムを想起し,地震による 構成要素(以下要素と記す)の被災を確率事象とする.



図1 復旧曲線の概念図

要素 *i*の持つ性能 *r_i*は被災により 0.0 になるとする. 先ず並 列システムでは,システムの性能は要素の性能の和として 得られる.

$$R_{sys} = \sum_{i=1}^{n} R_i \tag{2}$$

ここに, R_{sys} はシステムとしての性能の確率変数を表す. R_i は要素 i の性能の確率変数であり, 具体的には図 2 のようになる. 図中 p_i は要素の損傷確率を表し Fragility Curveによって求めることができる.



図2構成要素 i の損傷確率と性能の確率関数 直列システムでは要素の性能の最小値を採ることになり, 以下のようになる.

$$R_{sys} = \min_{i=1}^{n} R_i \tag{3}$$

一方,図3は直列・並列が混在するシステムの例である. 図の例では(2)式,(3)式を参照し、システム性能の確率 変数は以下のようになる.

 $R_{sys} = \min(R_1, \min(R_3, R_4 + R_5) + R_2, R_6)$ (4) (2)式, (3)式の具体的な計算方法について示す. (2)式は 多変数の確率和により求められるが, R_i は確率関数である ため(図2参照), イベントツリー等を用い離散的に計算

 Key words:事業継続計画,復旧曲線,システム信頼性,システム性能,地震リスク

 連絡先:東京都新宿区西新宿4丁目 5-1 幸伸ビル3F
 TEL:03-5351-3781

 FAX:03-5351-3783



図3 直列と並列の混在システムの例 することができる. (3)式は要素間の損傷事象の独立を仮 定すると,以下のようになる.

$$G_{R}(r) = \prod_{i=1}^{n} G_{Ri}(r)$$
(5)

ここに, $G_R(r)$ はシステム性能の超過確率関数, $G_{Ri}(r)$ は要素の性能の超過確率関数である.

次に, 軽微や大破などの被災状況に応じて復旧期間は 変わる. そこで, 被災状況に応じた復旧期間 t を条件に要 素の性能の確率関数を評価する. 具体的には, 既定の復 旧期間以上になる要素の損傷確率(例えば軽微以上の確 率)を使い(2),(3)式を計算する. これを既定の復旧期間の 数だけ繰り返し, 復旧期間 tを条件としたシステム性能の超 過確率関数 $G_{R}(r|t)$ を求める. 一方, 復旧過程については 以下の関係が導かれている⁴⁾.

$$G_T(t \mid r) = 1 - G_R(r \mid t)$$
(6)

(6)式より,性能を条件とした復旧期間の超過確率関数 *G_T(t| r)*を求め,これを(1)式に適用すれば,復旧曲線を求 めることができる.

4. 要素性能の影響シミュレーション

要素の性能の違いによる復旧曲線への影響について示 す.図4は4要素から成る並列・直列システムを,性能が異 なる3つのケースを取り上げ例示している.各ケースのシス テムとしての当初の性能は100%とする.先ず,Case1は各 要素それぞれが100%の性能を持つので,構成要素の12 あるいは34が同時に損傷しない限り,当初の性能(100%) を発揮できる.Case2は要素34が50%の性能であり,これ らのどちらか一方が損傷した場合にはシステム性能は50% となる.Case3は全ての要素が50%の性能であり,どれか一 つでも損傷すると50%の性能となる.Case1は構成要素に 十分な余力があり,1つの要素が損傷しても当初の性能を 維持できるが,Case2とCase3は1つの要素の損傷によっ てシステム性能は半減する可能性がある.

各構成要素の損傷確率を軽微 0.2(軽微以上は 0.3), 大破 0.1 とし,復旧には軽微 1 日,大破 30 日を要すると仮 定する.また復旧は同時復旧とする.前記の定式化に従い 復旧曲線を計算し,描画したものを図 5 に示す.図には復 旧期間(日)の期待値を付記している. 図より, 要素の性能 によって復旧過程は異なり, 余力のあるケース1が最も早く 当初の性能を回復することが分かる. また, Case1 の結果 は minimal cut set を用いて計算することができ, 一般的な 並列システムの解となる.



図4 要素の性能の違いを考慮した並列・直列システム



図5 性能の違いによる復旧曲線

5. まとめ

構成要素の性能や余力を考慮した地震時復旧曲線を 評価する方法を提案した.4 要素から成る並列・直列シス テムを例に要素性能の違いによる復旧曲線への影響につ いて示した.その結果,要素の性能によって復旧過程は異 なり,性能の余力によって早期に当初の性能を回復するこ とが分かった.本手法は水道や道路システム,同一の製品 を製作する生産工程など適用範囲は広い.なお,本提案 は地震損傷の独立を仮定し,復旧は同時に行われる,な どの前提がある.これらの改善点は今後の課題とする.

参考文献

- 中村孝明,遠藤透:BCP への貢献を目的とした建物の機能 確保に関する研究,建築学会総合論文誌, No.7 都市・建 築に関わる安全・安心のフロンティア, pp.87-92. 2009.1
- 2) 中村孝明:BCP 策定支援情報としての操業停止評価と財務 影響分析,土木学会第8回地震災害マネジメントセキナー講演集, 2007.3.
- 静間俊郎,中村孝明,吉川弘道:地震損傷相関を考慮した 施設群の機能停止評価,土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, 2009.6
- 4) 静間俊郎,中村孝明:復旧曲線の理論的考察とBCP への適用,土木学会第1回地震リスクマネジ・メントと事業継続性シンポジ ウム論文報告集,pp.231-236,2009.11

浄水場配管の地震時復旧シミュレーション

日本上下水道設計	正会員	〇大嶽公康
篠塚研究所	正会員	静間俊郎

- 東京都市大学 フェロー会員 吉川弘道
 - 日本上下水道設計 正会員 馬場啓輔

1. はじめに

水道の耐震化の指標は管路耐震化率等を用いられること が多い。管路耐震化率はレベル2地震動に対する耐震性が 確保されている管路の割合を示すもので,耐震化事業の達 成度の指標としては有用であるが,復旧期間は明確になら ない。水道利用者から耐震化事業の理解を得るためには, 復旧期間を耐震化の指標とすることがより効果的である。 本研究では仮想の浄水施設の配水機能を対象とし,信頼性 理論に基づいて復旧シミュレーションを行い,復日期間を 指標とした水道の耐震化の効果を考察する。

2. 解析対象施設及び解析モデルの概要

対象施設は、仮想の中規模浄水場(急速ろ過方式,処理 能力 Q=100,000m³/日)であり、神奈川県小田原市に位置す る。図-1 に施設概要及び解析モデルを示す。解析対象要素 は過去の地震において被害が多い埋設管路と躯体との接続 部の継手とした。施設は1期工事と2期工事に分割して建 設され、それぞれで使用されている継手条件は異なってい る。さらに、浄水池が位置する D~E~F の配管部は埋戻地盤 で軟弱地盤である。それぞれの配管は1系統から4系統で 構成されている。

図-2 は当該浄水場の配水機能をモデル化したもので、図 中の矩形ブロックは解析対象とした 14 配管である。ブロッ ク下にはこれらの通水能力(以下,性能)を併記した。こ の性能は浄水場全体の性能を 100%とし、A~F の配管の性



※地盤増幅度 ARV の算定式は藤本・翠川(2006)の式を適用した

図−3継手伸縮量の限界変位の工学的基盤面絶対速度への変換

能をそれぞれ設定している。ここで、当該浄水場の性能の確率変数 R_{sys} は文献 1)を参照すると、下式で示される。 $R_{sys} = \min(R_A, \min(R_{B-1} + R_{B-2}, R_{C1-1}, R_{C2-1}) + \min(R_{B-3} + R_{B-4}, R_{C1-2}, R_{C2-2}), R_D, \min(R_{E-1}, R_{F-1}) + \min(R_{E-2}, R_{F-2}))$ (1) ここに、 $R_A \sim R_{F-2}$ は個々の配管の性能の確率変数である。

3. モデルの脆弱性の評価(耐力中央値の設定)

水道施設の耐震設計では、接続部の継手伸縮量を静的解析で簡易に算定する場合、地盤変位量と躯体変位量の和よ り求めてよいとされている²⁾。ただし、本研究の解析対象の急速ろ過池等の構造物は、アスペクト比が大きく、躯 体の剛性が非常に大きいため、構造解析による地震時変形量は地盤変位量の1/10以下となる。したがって、本研究 では継手伸縮量の評価は地盤変位のみを対象とした。表-1に各配管の被災時の限界最大速度(耐力中央値)と復旧 期間を示す。なお、この耐力中央値は、継手伸縮量の限界変位を図-3に示す方法に従い、工学的基盤最大速度(以 下、PBV)へ変換したものである。

キーワード 埋設管,地震リスクマネジメント,復旧曲線,復旧期間,ボトルネック指標

連絡先 〒141-0031 東京都品川区西五反田 7-20-9 日本上下水道設計(株) 東京総合事務所水道部 03-5745-2890

-597

4. 解析結果

復旧シミュレーションでは, M8.0 および M7.0 関東地 震の 2 シナリオ地震³⁾ を検討対象とした。当該敷地に おける PBV は,安中の距離減衰式より, M8.0 関東地震 で 91Kine, M7.0 関東地震で 28Kine となる。なお,復旧 シミュレーションでは,地震時の各配管の損傷は独立, 復旧は同時に行われるという前提に基づいている。

(1) 現況の復旧シミュレーション

図-4に M7.0 関東地震と M8.0 関東地震のボトルネック指標(Bottleneck Index;以下,B.I.)の算定結果を,
 図-5 に復旧曲線を示す。復旧曲線の縦軸は性能回復率

(復旧率)であり、当初の性能(Q=100,000m³/日)を 100%(性能回復率1.0)とした場合の回復度合を示す。

埋戻地盤で1系統のみのD配管部の被害が最も影響 が大きく、次に埋戻地盤の1期系の配管とA配管の影響が大きくなっている。M8.0関東地震ではD配管の影響が支配的であるため、復旧曲線が直線となっている。

(2)対策後の復旧シミュレーション

対策後の復旧シミュレーションでは、B.I.の高い要素の限界変位を 20cm(基盤最大速度 195cm/s)に強化するものとして、次の 3 ケースの検討を行った。

Case1:D 配管を強化 Case2:D, E1,F1 配管を強化

Case3:A,D, E1,F1 配管を強化

図-6 に対策後の復旧曲線を示す。M8.0 関東地震では D 配管とA 配管の対策効果が大きいが,M7.0 関東地震で は D 配管と E1, F1 の配管の対策効果が大きくなった。 各シナリオ地震による対策効果の相違は,図-4 の B.I. の相違と一致している。このように復旧曲線を用いるこ とで,対策効果を復旧期間の減少として表示でき,対策 効果の違いも明確となった。

5. おわりに

本研究では水道システムのボトルネックを定量的に評価し,対策前後の復旧期間を比較することで,対策効果 を明確にすることができた。今後は解析結果を基にして, 復旧曲線を用いた耐震化事業の最適投資額の算定を行う とともに,復旧シミュレーションを水道事業全体の水道シス テムや下水道施設へ応用していく予定である。

参考文献: 1)中村孝明他;構成要素の個別性能を考慮したシステムの 地震時復旧曲線,土木学会年次学術講演会講演集(投稿中),2010,2)日 本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説,2009,3)宇賀田健:シナリオ 地震による日本全国の地震危険度評価,建築学会構造系論文集,第541 号,2001.

表-1 各配管の耐力中央値と復旧期間

要素			1期系統	춙(Uy=2cm)	2期系統(Uy=10cm)	
= =	系列	1系列	PBV	復旧日数	PBV	復旧日数
記方	数	の性能	(cm/s)	(日)	(cm/s)	(日)
A	1	100%	65	5		
В	2	50%	65	2	325	2
С	4	25%	65	3	325	3
D	1	100%	20	5	/	
Е	2	50%	20	3	98	3
F	2	50%	20	3	98	3











東急建設(株) 正会員

1. はじめに

事業継続計画(以下,BCP)¹⁾への関心に伴い, 製造業 のみならず, 道路, 鉄道, 港湾, 空港などのインフラ施設に ついても, BCP という観点からの耐震検討が進められつつ ある. BCP 策定では, 事業(機能)停止・低下の可能性や その期間の推計が重要となる.

鉄道路線や高速道路などは,直列状に構築物が連なっ たシステムとして構成されており,1箇所の被災が路線運 休や通行止めを招く.一方で,巨視的にみると代替路線や 迂回路などにより,システムとしての冗長性は最低限保た れ,ある程度の機能水準は確保できる.

本稿は、首都圏鉄道路線の主事業である輸送機能に着 目し、地震時におけるシステムリスクを解析する.具体的に は、本稿(その1)でシステムリスク解析における基礎理論 について整理し、さらに復旧曲線およびボトルネック指標 の評価方法を示した.また、本稿(その2)では、解析モデ ルを詳述し、現状および耐震対策後の結果を考察する. なお、ここでのシステムリスクとは、システムとしての復旧期 間、復旧過程、ボトルネック、システム全体としての冗長性 などを捉えたシステム性能の低下や喪失を意味する.

2. システムの復旧期間確率関数の評価方法

システムが地震損傷を受ける場合を想起し,直列システムの復旧期間確率関数の評価方法を以下に示す.復旧に 要する期間(以下,復旧期間)は,損傷の箇所やその程度 により異なるが,施設の持っている機能の早期回復を目的 としていることから,損傷箇所について同時に作業が進め られるものとし,最短の期間で復旧作業は完了するものと する.これを復旧期間最小化原則と呼ぶこととする.

復旧期間最小化原則に従うと、システム中の最も復旧に 要する施設の復旧期間が、システム全体のそれとなる.こ こで、図1に示すようなn個の施設(以下,要素)の地震時 の復旧期間をそれぞれ確率変数 T₁~T_nとすると、直列シス テムの復旧期間は、複数要素の復旧期間の組み合わせの 最大値が選ばれることになる.これより、復旧期間は、地震 動の大きさxを条件として以下にように表すことができる.



図1 直列システムを構成する要素の復旧期間



図2 要素iの復旧期間非超過確率関数

 $T_{|x} = \max(T_1, T_2, \cdots, T_n \mid x) \tag{1}$

(1)式中の max()は、それぞれの確率変数(復旧期間)の 組合せの最大値が選択されるという意味である.極値の確 率分布の教えるところにより、復旧期間の非超過確率関数 (以下,確率関数) $F_{T}(t|x)$ は、要素の損傷事象の独立を前 提に、直列システム((1)式)の場合は以下となる.

 $F_T(t \mid x) = P(T_1 \le t, T_2 \le t, \dots, T_n \le t \mid x)$ (2)

$$F_T(t \mid x) = \prod_{i=1}^n F_{T_i}(t \mid x)$$
(3)

ここに, $F_{Ti}(t|x)$ ($i = 1 \sim n$)は, 要素の地震動の大きさx の条件付復旧期間の確率関数である. これより, システムの復旧期間は, 各要素の復旧期間の確率関数の積によって求められることになる.

3. 要素の復旧期間確率関数の評価方法

各要素の復旧期間の確率関数 $F_{Ti}(t|x)$ は、図2に示す要素の損傷確率 $P_{fi}(x)$ と復旧期間によって求められる. 同図は、損傷が発生する、しないの2分岐の例であり、損傷発生時の要素の復旧期間を t_{max} (図2では30日)とすると、復旧期間の確率関数は下式で表すことができる.

Key words: BCP, システムリスク, システム性能, 冗長性, 復旧曲線, ボトルネック指標 連絡先:東京都新宿区西新宿4丁目 5-1 幸伸ビル 3F TEL: 03-5351-3781 FAX: 03-5351-3783 $F_{Ti}(t \mid x) = 1.0 - P_{fi}(x), t = 0$ = 1.0 , $t = t_{max}$ (4)

上式の損傷確率 $P_{fi}(x)$ は,構造信頼性に基づく Fragility Curve により求める.なお,図2は2分岐としたが,必要に応じ適宜,無被害,軽微,全壊などの3分岐以上にする.

ここで、地震動の大きさ x は確定量であることに注意する. Fragility Curve より求めた損傷確率 $P_{fi}(x)$ は、耐震耐力の 不確実性は考慮しているものの、地震動の大きさ x のそれ は考慮していない、リスク解析において、シナリオ地震を想 定した場合には、波動伝播の誤差や表層地盤の増幅特性 の不確実性等、作用地震動の大きさのばらつきを考慮す る必要がある.この地震動の大きさの不確実性を考慮する 方法の具体的記述については、文献 2)を参照されたい.

4. 復旧過程とボトルネックの評価方法

(1) 復旧曲線

復旧曲線は本来の機能が低下或いは停止し、その後機 能が完全に回復するまでの経時的なプロセスを描いた曲 線と定義する. 横軸は復旧に要する期間, 縦軸は本来の 機能を1.0とした機能回復率(復旧率)である. 地震被害の 発生や復旧期間の不確実性を前提とすると、無数の復旧 曲線が予想でき、予想に漏れがない限りこの中の一つは 必ず実現することになる. しかしながら、実現するであろう 復旧曲線を特定することはできないため、平均的な曲線を 求めこれを復旧曲線として代表させる. また、復旧曲線は 復旧期間と機能回復率の 2 軸に描画されるため、それぞ れの軸方向の平均値を採ると2種の曲線³⁾が求められる.

本稿では予め設定した機能毎の復旧期間の期待値を 短い順に,機能回復率に対して結んだ曲線を復旧曲線と する.図3に示すこの曲線は,機能が限定されるシステム の復旧過程を視覚的に把握するのに優れている.復旧曲 線は一般的に下式で示される³⁾.

$$R(r_L) = \int_{0}^{\infty} (1 - F_T(t, r_k)) dt , k = 1 \sim L$$
 (5)

ここに, $F_T(t, r_k)$ は機能 k の復旧期間の確率関数であり, r_k は全体機能を 1.0 とした各機能の率である. 右辺は各機能 の復旧期間の期待値を計算している.

また、図中の RTE (Recovery time expectancy;以下, RTE)はシステムとしての復旧期間の代表値であり、下式に 示すように各機能の復旧期間の期待値にその機能の率を 乗じることにより求められる.

$$RTE = \sum_{k=1}^{L} R(r_k) \cdot r_k \tag{6}$$



(2) ボトルネック指標

システムを構成する要素が多数,あるいはシステムの機 能が多様となると,対象システムおいてボトルネックとなる 要素を見出すことが難しい.そこで,ボトルネックとなる要 素を効率的に選定するためにボトルネック指標(Bottleneck Index;以下, B.I.)が提案³⁾されている.B.I.は、システム全 体機能への影響度(重要性),脆弱性(耐震性),復旧難 易度(修復性)の積で表され,以下のようになる.

$$B_i = e_i \cdot E(T_i), \quad i = 1 \sim n \tag{7}$$

ここに, *i* は要素, *n* はシステム中の要素総数, *e_i* はシステム 全体機能への影響度である. *E*(*T_i*)は, 地震発生を条件と した要素 *i* の復旧期間の期待値を表し, 下式で示される.

$$E(T_i) = \sum_{all \, j} p_{fij} \cdot t_{ij} \tag{8}$$

ここに, *j* は損傷形態, *p*_{fij}と*t*_{ij}は要素 *i* に関する損傷形態 *j* の発生確率ならびに復旧期間である. *p*_{fij} は要素の脆弱性 を表し, *t*_{ij} は復旧難易度を表す. (8)式より, B.I.は時間の 単位を持つ.

5. まとめ

本稿(その1)ではシステムリスク解析における基礎理論 を整理すると共に,復旧曲線,ボトルネック指標の評価方 法を示した.なお,本稿(その2)ではシステムモデルを構 築し,シナリオ地震時の復旧曲線,RTE,B.I.を算出する. 参考文献

1) 内閣府:中央省庁業務継続ガイドライン第一版,2007

- 2) 中村孝明:相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評
- 価,建築学会構造系論文集,第 623 号, pp.49-56, 2007. 3) 静間俊郎他:復旧曲線の理論的考察と BCP への適用,第 1
- 回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウムー SRM&BCPの現状と課題ー講演論文集, pp.231-236, 2009.
- 4) 中村孝明他:BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に 関する研究,建築学会総合論文誌, No.7 都市・建築に関わ る安全・安心のフロンティア, pp.87-92., 2009.1

-603

首都圏鉄道路線の地震時システムリスク解析(その2)

-仮想路線の地震後復旧シミュレーション-

- 東急建設(株) 正会員 前田欣昌 正会員 服部尚道 正会員 奥村幹也
 - (株)篠塚研究所 正会員 静間俊郎
 - 東京都市大学 フェロー会員 吉川弘道

1.解析目的と解析対象

首都圏西部の郊外と都市中央環状線を結ぶ放射状お よび環状の3鉄道路線を解析対象とし、図1に示す.この 東西約40km,南北約30kmの広範に敷設する鉄道路線 は仮想の路線であり、図中の丸数字は主要駅である.本 稿(その2)では地震時の被災箇所として鉄道高架橋に着 目し、シナリオ地震における対象路線のシステムリスクを解 析する.なお、シナリオ地震は対象施設周辺で発生するで あろう様々な地震源と規模を特定した想定地震である¹⁾.

解析においては,高架橋の設計年代の違いによる脆弱 性の差異を考慮し,脆弱性を耐震性小,中,大の3タイプ に分類した.また,高架橋立地点の地盤は,普通地盤と軟 弱地盤の2種類に仮定した.以上の条件設定の下,郊外 から都市中央環状線に向かう上り線について,利用客数を 影響度(重要性)とし,復旧曲線や復旧期間期待値 (Recovery time expectancy;以下, RTE),ボトルネック指 標(Bottleneck Index;以下, B.I.)を検討した.なお,評価 対象である高架橋は主要駅地点に配置している.

2.システムモデル

対象路線は,放射状路線としてA線とB線,A線とB線 を結ぶ環状C線の3路線から成っており,輸送機能を図2



に示すブリッジ構造を有するラダーシステムにモデル化した.また,図2には,輸送経路として考えられる6つの系統 (A1~A3,B1~B3)を併記した.これら6系統を,途中駅からの乗客を考慮して,30系統の直列システム(輸送経路) に分解し,各系統の乗客比率を設定した.この30系統の 乗客比率を駅(高架橋立地点)ごとに集計し,各駅の影響 度を求め,その値を図2に棒グラフで表記した.

3.施設の脆弱性の評価

解析対象施設である高架橋の種類は,鉄道の設計基準の変遷を参考に3種類とした. TYPE I は設計年代の古いせん断破壊型, TYPE II は設計震度が低い曲げ破壊型, TYPE III は設計震度が低い曲げ破壊型, TYPE III は現行の設計基準²⁰を満足する高架橋である.

各高架橋の損傷度は小破,中破,大破の3区分とした. 各損傷度に対する弾性応答加速度(耐力)は,設計震度 の違いや,実構造物の耐力が材料強度の余裕や照査値 の余裕等により,設計上の耐力よりも大きくなると考えられ る点を考慮した.このようにして求めた各高架橋の損傷度 に対する弾性応答加速度を耐力中央値として設定した. 表1~表3に3種類の高架橋の各損傷度に応じた耐力中 央値を復旧期間とともに示す.なお,TYPE I の高架橋を 補強した場合,TYPEIIIと同じ脆弱性になるものとした.

表1~表3の右側には耐力中央値を基盤最大加速度 (以下,PBA)に換算した値を記載している.この値は, 弾性応答加速度値を応答スペクトル比(地盤増幅率)と

表1 高架橋 TYPE I の脆弱性

	弾性応答		基準化基盤応答	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)		
	損傷度	加速度	復旧期間※	スペクトル	増幅率	基盤加速度	増幅率	基盤加速度
		$\alpha_{R}(gal)$	(日)	s	λ	$\alpha_{\rm R}/{\rm S}/\lambda$ (gal)	λ	$\alpha_{\rm R}/{\rm S}/\lambda({\rm gal})$
	無被害	0	0	1.825	1.4	0	1.6	0
	大破	472	60	1.825	1.4	185	1.6	162
ľ	WOOAL HA	よの復回期間	十十十十十	復回に手間がわけ	いてしまう	復回期間まっなに	+ Z	

表2 高架橋 TYPE II の脆弱性

	弾性応答		基準化基盤応答	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
損傷度	加速度	復旧期间※	スペクトル	増幅率	基盤加速度	増幅率	基盤加速度
	$\alpha_{R}(gal)$		S	λ	$\alpha_{\rm R}/S/\lambda$ (gal)	λ	$\alpha_{\rm R}/{\rm S}/\lambda$ (gal)
無被害	0	0	1.825	1.4	0	1.6	0
小破	720	3	1.825	1.4	282	1.6	247
中破	1188	10	1.825	1.4	465	1.6	407
大破	1800	60	1.825	1.4	705	1.6	616
※GOAL地点の復旧期間は、市街地で復旧に手間がかかると考え、復旧期間を2倍にする。							

表3 TYPFⅢ TYPFI(補強後)の脆弱性

地点の復旧期間は、市街地で復旧に手間がかかると考え、復旧期間を2倍にする。

			-,	- \11		- 11/0-0-0	/ 1-L
	弾性応答	後日期日本	基準化基盤応答	普通	i地盤(G3)	軟弱	地盤(G5)
員傷度	加速度	復旧期间※	スペクトル	増幅率	基盤加速度	増幅率	基盤加速度
	$\alpha_{R}(gal)$	(1)	S	λ	$\alpha_{\rm R}/S/\lambda$ (gal)	λ	$\alpha_{\rm R}/S/\lambda$ (gal)
₩被害	0	0	1.825	1.4	0	1.6	0
小破	1296	3	1.825	1.4	507	1.6	444
中破	2088	10	1.825	1.4	817	1.6	715
十日	2060	60	1.005	1.4	1100	1.0	1040

キーワード 鉄道路線, システムリスク, 復旧曲線, ボトルネック指標, 冗長性

連絡先 〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1-16-14 東急建設㈱ 土木技術部 土木構造・材料G TEL03-5466-5280

\$

基盤最大加速度で基準化した基盤応答スペクトル値で除したものである.基盤面および地表面での応答スペクトルは,文献 2)のL1 地震動の値を参照し,高架橋の固有周期は0.7~0.75sを想定した.本解析の地盤増幅率は,上記の条件において,普通地盤で1.4,軟弱地盤で1.6となる.PBA 換算された耐力中央値は,様々な種類,異なる年代に設計された施設の耐震性を一元的に管理/比較することを可能とする.

4.解析ケースと解析結果

解析ケースは 2 ケースとし, 各高架橋の種 類との関係を表 4 に示す. ケース 1 は無補強 の場合であり, ケース2はTYPE I の高架橋を 補強したケースである.

表4 解析ケース							
主要	駅 高架橋	地盤種別	ケース1	ケース2			
1	相模湖	普通(G3)	Ш	Ш			
2	矢部	普通(G3)	Π	Π			
3	新百合ヶ丘	普通(G3)	I	Π			
4	狛江	普通(G3)	I (前)	I (補)			
5	渋谷	普通(G3)	I (前)	I (補)			
6	八景島	軟弱(G5)	Π	Ш			
7	磯子	軟弱(G5)	I (前)	I (補)			
8	横浜	軟弱(G5)	I (前)	I (補)			
9	川崎	軟弱(G5)	I (前)	I (補)			
10	旗の台	普通(G3)	I (前)	I (補)			
11	恵比寿	普通(G3)	I (前)	I (補)			
10		At 17 (00)	* (24)	* (1-4)			

普通(G3)

対象施設周辺における様々なシナリオ地 震を想定し、対象路線のシステムリスクを検討 した.リスク解析にあたり、高架橋立地点の PBAは、安中の距離減衰式³⁾を用いて推定し、 地震動の大きさおよび施設耐震耐力のばら

つき(対数標準偏差)をそれぞれ 0.5, 0.3 と設定した.

路線システム全体の RTE 上位 30 位までのシナリオ地震 源を図 3 に示す. 図中の○は対象施設, ■は背景地震, 実線および破線に囲まれた領域はプレート境界地震の断 層面を示しており, 数字は RTE の順位を示している. これ によれば, 両ケースにおいて施設 10(旗の台)直下の背景 地震(139.70,35.60;M7.0)が最も路線システムに被害をも たらす(RTE が最大となる)地震であることがわかる.

図 4 は,代表的なシナリオ地震として,背景地震 (139.70,35.60;M7.0),関東地震(M8.0),立川断層(M7.4 に着目し,復旧曲線と RTE を示したものである.背景地震 (139.70,35.60;M7.0)の場合,完全復旧までにケース1で 111.1日,ケース2で12.8日であり,RTEはケース1で109.8 日,ケース2で8.9日である.補強により,両ケースにおい て完全復旧までの期間が短縮されているのと同時に,復 旧曲線に差が見られることが確認できる.

図 5 は背景地震(139.70,35.60;M7.0)の B.I.を示したものである. ケース 1 では,復旧日数のかかる施設 11(恵比寿)や影響度が最大の施設 10(旗の台)などがボトルネック





となっている. また, ケース2ではTYPE I を補強しているこ とから, 際立ったボトルネックは見られないが, 高架橋 TYPE II の施設 3(新百合ヶ丘)が最上位になっており, 補 強によりボトルネック箇所が変化していることがわかる.

5.まとめ

本稿では、広域鉄道路線を対象に、利用客数を影響度 とし、補強前後のシステムリスク解析を行った.本解析手法 は、鉄道路線システムの冗長性を考慮し、復旧曲線や B.I. を定量的に評価できる.評価結果は、視覚的にも分かりや すく、BCPの策定や防災対策の立案に有用であると考える. 今後は、地下トンネルや盛土など各種構造物を配置し、鉄 道路線のシステムリスクを評価する予定である.

参考文献

- 宇賀田健:シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価, 建築学会構造系論文集,第541号,pp.95-104,2001.
- 2) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準(耐震設計), 1999.10
- 3) 安中正,山崎文雄,片平冬樹:気象庁 87 型強震計記録を用 いた最大地震及び応答スペクトル推定式の提案,第24回地 震工学研究発表会講演論文集,pp.161-164,1997.